

stratégies à la fois SA et SC, par exemple la stratégie *Périodique-cct*.

Que découvrent-on en considérant les 17 stratégies de l'encadré ci-dessous ? La simulation se fait avec des rencontres en face-à-face de 1 000 étapes et en utilisant les valeurs classiques $T=5, R=3, P=1, S=0$. Lors de la rencontre en tournoi, les stratégies SA gagnent en moyenne ; viennent ensuite les SC, puis les IA et, enfin, les IC : $SA > SC > IA > IC$.

Cet ordre suggère que coopérer initialement n'est pas une bonne idée. Cependant, la méthode du tournoi autorise une stratégie agressive, telle *Méchante*, à exploiter les stratégies coopératives et non réactives comme *Gentille* (voir l'encadré page 81). Or dans une arène évolutive, les *Gentille* se font rapidement éliminer, ce qui entraîne l'élimination des *Méchante* qui les exploitaient.

Le classement obtenu lors de la compétition écologique met cela en évidence. Avec

les 17 stratégies de l'encadré ci-dessous, il est le suivant : $IC > SC > SA = IA$.

L'élimination des stratégies exploitées par des stratégies agressives a pour conséquence ultime le recul de ces dernières : n'ayant plus de stratégies naïvement coopératives à ponctionner, leurs gains diminuent et donc leurs descendance se raréfient. Pour réussir dans une compétition écologique, il faut être efficace (c'est-à-dire accumuler des points) face aux stratégies efficaces

« initialement coopératives » (IC), qui ne prennent jamais l'initiative de trahir ; il y a celles qui, à l'opposé, prennent cette initiative et sont « spontanément agressives » (SA) ; il y a celles qui sont « initialement agressives » (IA), elles trahissent aussi longtemps que l'autre n'a pas coopéré ; enfin, il y a celles qui, à l'opposé, sont spontanément coopératives (SC).

En tournoi, les moyennes par sous-classe donnent ainsi :

$SA > SC > IA > IC$.

Le résultat de la compétition écologique est différent :

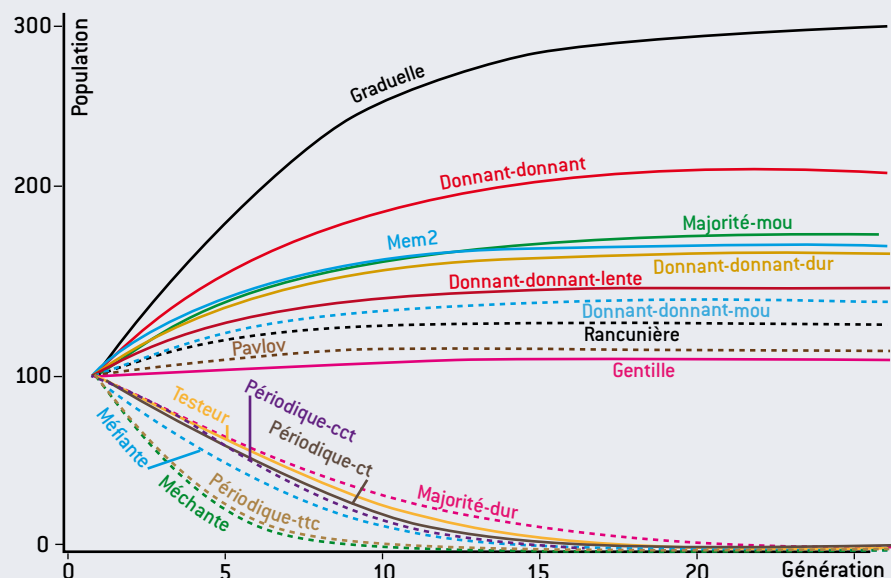
$IC > SC > SA = IA$.

Plus précisément (le nombre de stratégies par sous-classe est indiqué entre parenthèses) :

Moyenne des IC (10) = 170 ;
moyenne des SC (13) = 130 ;
moyenne des SA (7) = 0 ;
moyenne des IA (4) = 0.

En tournoi, l'agressivité est un peu favorisée. En revanche, dans les compétitions écologiques, il faut rester performant, même quand les plus faibles ont disparu par la sélection naturelle. Il vaut mieux alors coopérer en début de face-à-face (IC) et surtout ne pas attendre que l'autre le fasse (IA).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	3000	0	3000	3000	3000	2997	999	2001	2997	1500	3000	3000	3000	3000	3000	6	3000
2	5000	1000	1004	1004	1004	1000	2332	3668	1000	3000	3000	1008	1008	1008	1068	1008	1004
3	3000	999	3000	3000	3000	2500	1998	2667	2500	2498	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000
4	3000	999	3000	3000	3000	1003	2331	3663	1003	2997	3000	3000	3000	3000	3000	1007	3000
5	3000	999	3000	3000	3000	2500	2331	2001	2500	1500	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000
6	3002	1000	2500	1003	2500	1000	2332	2003	1000	2500	2999	3002	2999	3002	3001	2501	1007
7	4334	667	2003	671	671	667	1666	3335	1999	2500	3002	3335	675	675	752	2006	671
8	3666	333	2667	343	3666	3663	1665	2334	2664	2000	2003	3666	1671	3666	491	2664	350
9	3002	1000	2500	1003	2500	1000	1999	2669	1000	2500	2003	3002	1008	3002	3001	3000	1008
10	4000	500	2503	507	4000	2500	1665	2835	2500	2000	2250	4000	507	4000	615	2503	507
11	3000	500	3000	3000	3000	504	1332	2833	1998	2250	3000	3000	3000	3000	3000	2003	3000
12	3000	998	3000	3000	3000	2997	1665	2001	2997	1500	3000	3000	3000	3000	3000	1001	3000
13	3000	998	3000	3000	3000	2999	2330	3331	1008	2997	3000	3000	3000	3000	3000	1008	3000
14	3000	998	3000	3000	3000	2997	2330	2001	2997	1500	3000	3000	3000	3000	3000	1001	3000
15	3000	983	3000	3000	3000	2996	2302	3596	2996	2955	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000
16	4996	998	2999	1002	2999	2496	1996	2669	2995	2498	1998	1016	1008	1016	2999	1004	2999
17	3000	999	3000	3000	3000	1012	2331	3660	1008	2997	3000	3000	3000	3000	3000	2999	3000



La méthode des transformations

Partant d'une famille de stratégies *C*, on transforme chaque stratégie *Str* en l'adoucissant ou en la durcissant, ce qui donne une nouvelle stratégie *Str'* et donc une nouvelle famille *C'*, que l'on compare à *C* pour savoir si la transformation opérée est une amélioration. Quatre transformations ont été envisagées.

1) Adoucissement-1: *Str'* coopère tant qu'elle n'a pas été trahie, ensuite elle joue comme *Str*.

2) Endurcissement-1: *Str'* trahit tant que son adversaire n'a pas coopéré, ensuite elle joue comme *Str*.

3) Adoucissement-2: *Str'* joue comme *Str* si l'adversaire a trahi au dernier coup et coopère sinon. Dit autrement, *Str'* fait comme *Str*, sauf qu'elle renonce à trahir si l'autre a coopéré au dernier coup. *Str'* est une version indulgente de *Str*, prête à n'importe quel moment à pardonner un adversaire coopératif.

4) Endurcissement-2: *Str'* joue comme *Str* si l'adversaire a coopéré au dernier coup et trahit sinon. *Str'* est une version sévère de *Str*, qui à n'importe quel moment durcit ses réactions face à un adversaire qui refuse de coopérer.

A. Avec les 17 stratégies de base
Partant des 17 stratégies de l'encadré pages 82-83, on obtient

avec toutes les variantes 85 stratégies. On fait alors les moyennes des résultats (pour le tournoi et pour la compétition écologique) des normales (les 17 de départ), des 17 adoucies par Adoucissement-1, des 17 endurcies par Endurcissement-1, etc. En tournoi comme en compétition écologique, on obtient :

Adou-1 > Adou-2 > Normal > Endur-2 > Endur-1

Les deux transformations adoucissantes produisent des familles meilleures que la famille initiale, la première méthode d'adoucissement produisant une amélioration plus forte que la seconde.

B. Avec Mémoire (1, 1)

Les 32 stratégies de la famille Mémoire (1, 1) conduisent à un ensemble de 160 stratégies qui donnent en tournoi :

Endur-2 > Adou-1 > Normal > Endur-1 > Adou-2. En compétition écologique, on a :

Adou-1 > Endur-2 > Adou-2 >

Normal > Endur-1.

En tournoi, certaines formes de durcissement semblent présenter de l'intérêt, mais c'est pour l'essentiel une illusion, car en compétition écologique on retrouve le classement précédent avec juste un léger mieux pour Endur-2.

C. Avec Mémoire (1, 2)

En tournoi, on obtient :

Adou-1 > Normal > Endur-2 > Adou-2 > Endur-1.

En compétition écologique, le classement est :

Adou-1 > Adou-2 > Endur-2 > Normal > Endur-1, ce qui est presque le même classement que précédemment avec une perte d'une position pour Endur-2 qui se révèle assez souvent avoir de l'intérêt.

À nouveau l'adoucissement-1 est gagnant et c'est, des quatre méthodes de transformation, la meilleure. L'adoucissement-2 et l'endurcissement-2 font mieux que ne rien faire. La conclusion est claire : l'adoucissement-1 (en début de face-à-face) est souhaitable d'une manière générale et plus intéressant que l'adoucissement-2, qui reste cependant presque toujours intéressant. L'endurcissement-2 (tout le long du

face-à-face) est assez souvent bénéfique, alors que l'endurcissement-1 (en début de face-à-face) est toujours mauvais.

Il faut noter que l'adoucissement-2 est conditionnel : on est indulgent avec ceux qui sont coopératifs dont on oublie plus facilement le manque de coopération passé. Il est compatible avec l'endurcissement-2, qui consiste à changer son comportement pour le rendre plus agressif dès lors que l'adversaire refuse de coopérer.

Finalement, on observe que parmi les quatre transformations envisagées, le plus souvent, trois d'entre elles sont intéressantes : l'adoucissement en début de face-à-face et au cours du face-à-face et l'endurcissement au cours du face-à-face. Seul l'endurcissement en début de face-à-face est invariablement mauvais.

On pourrait traduire cela par : abordez toujours un éventuel collaborateur avec indulgence, soyez tolérant à propos de son comportement passé s'il se met à coopérer, renforcez vos réactions punitives s'il se montre agressif, mais surtout ne commencez jamais par trop de sévérité et d'exigences.

dans tous les types d'environnements et ne pas se contenter de profiter des faibles. Il faut aussi bien jouer contre soi-même. Les compétitions écologiques sont plus réalistes que les tournois : le meilleur type de comportement est la coopération initiale, le pire l'agressivité initiale.

Pour s'assurer de la robustesse de cette conclusion, nous avons refait la même expérience avec d'autres classes de stratégies. En particulier, nous avons considéré une classe de 1 024 stratégies choisies de façon systématique sans aucun biais (un tel biais,

peut-être inconscient, ne pouvait être exclu avec les 17 envisagées de la première expérience). Nous avons donc pris toutes les stratégies *Strat* dont le comportement dépend du dernier coup de *Strat* et des deux derniers coups joués par l'adversaire. Cette classe de stratégies se nomme Mémoire [1, 2]; elle correspond à toutes les façons possibles dont peut jouer une stratégie se souvenant uniquement de son dernier coup et des deux derniers coups de l'adversaire.

La classe Mémoire [1, 2] en tournoi donne $IC > SC > SA > IA$. En compétition écologique,

le classement devient $IC > SC > SA = IA$, qui confirme les résultats obtenus avec les 17.

Plus aucun doute : l'environnement objectif prouve définitivement qu'un comportement initialement coopératif doit être recommandé. Si cette méthode directe d'analyse est concluante, elle ne permet pas d'affiner les conclusions sur l'intérêt des comportements coopératifs ou agressifs qui peuvent être de différentes natures et ne pas concerner seulement les débuts de parties. C'est pourquoi nous avons introduit la « méthode des transformations ».

L'idée de la méthode est de partir d'une classe de stratégies intéressantes C et d'opérer une transformation systématique de toutes les stratégies de la classe, ce qui donne une classe C' . Nous avons introduit deux méthodes d'adoucissement et deux méthodes d'endurcissement. Quand on applique une méthode d'adoucissement à une stratégie Str , on obtient une stratégie identique à Str ou moins agressive. De même, appliquer une méthode d'endurcissement conduit à des stratégies inchangées ou plus agressives.

L'adoucissement-1 consiste à partir d'une stratégie Str et à définir la stratégie transformée Str' suivante : au premier coup, Str' coopère, et elle continue de coopérer tant que l'adversaire n'a pas trahi ; dès que l'adversaire a trahi, Str' se met à jouer comme Str aurait joué. La stratégie Str' a donc un comportement identique à celui de Str , sauf qu'elle ne l'applique que lorsque l'adversaire a pris l'initiative de trahir. Bien sûr, si on part d'une stratégie Str initialement coopérative, Str' lui est identique.

La méthode d'endurcissement-1 est symétrique de la méthode d'adoucissement-1 : Str' trahit tant que l'autre n'a pas coopéré, et se met à jouer comme Str dès que l'autre a coopéré. Cette transformation rend initialement agressives les stratégies Str qui ne le sont pas, et ne change pas celles qui le sont.

L'adoucissement-2 permet d'explorer une autre façon de rendre plus coopérative une stratégie quelconque. Quand on l'applique à une stratégie Str , on obtient une stratégie Str' qui se comporte comme Str à la nuance près que si au coup $n - 1$ l'adversaire a coopéré, Str' choisit toujours de coopérer. En clair, même quand Str veut trahir, Str' renonce et coopère à la condition que l'adversaire ait accepté de coopérer au coup $n - 1$. Str' est une version indulgente de Str , elle est prête à pardonner (sur la base du coup $n - 1$) à tout adversaire qui se montre coopératif, et ce quel que soit le passé des interactions. On définit symétriquement l'endurcissement-2.

Si l'on reprend les 17 stratégies de l'encadré pages 82-83, l'application des deux méthodes d'adoucissement et des deux méthodes d'endurcissement produit un total de $5 \times 17 = 85$ stratégies. L'encadré page ci-contre indique les résultats : *a*) s'adoucir est une bonne idée, qui améliore l'efficacité

moyenne des stratégies ; *b*) s'endurcir donne parfois un meilleur résultat immédiat (c'est-à-dire en tournoi), mais, si cela permet une certaine réussite en début d'évolution, c'est nuisible sur le long terme ; *c*) l'endurcissement 1 est, de toutes les transformations envisagées, la plus catastrophique.

Pour les longues rencontres où agit une forme de sélection naturelle, pratiquer l'adoucissement-1 (cela concerne le début des face-à-face) et même l'adoucissement-2 (qui, lui, produit des effets tout le long des face-à-face) est bénéfique. Il ne faut pas durcir votre comportement, et surtout pas au début.

Pour conforter cette analyse, on a souhaité faire des simulations avec des ensembles de stratégies constitués de façon systématique et ne pouvant donc être sujet d'aucun biais subjectif. Une expérience impliquant 5 120 stratégies a été menée. On fait jouer les unes contre les autres les 1 024 stratégies de la classe Mémoire [1, 2], et leur versions modifiées par les quatre transformations précédemment citées. Les résultats sont indiqués dans l'encadré page ci-contre.

Après trente ans d'études, une conclusion claire

D'autres expériences confirment que dans un monde où l'évolution joue son rôle en renforçant les effectifs des stratégies qui réussissent aux dépens de celles qui obtiennent des scores médiocres, alors les comportements coopératifs sont indubitablement les meilleurs. Il est particulièrement important de bien débiter les interactions, en coopérant aussi systématiquement que possible dans les premiers échanges d'un face-à-face. De plus, dans le déroulement d'une interaction, savoir être indulgent est globalement payant. Un renforcement de la sévérité, à condition qu'il ne s'applique pas aux débuts des face-à-face est parfois utile, mais moins payant que l'adoucissement.

Il est remarquable qu'après plus de trente ans d'études et la mise au point d'outils de simulations massives, un jeu à la définition aussi simple que le dilemme itéré du prisonnier produise encore des résultats nouveaux, clairs et précis sur la façon dont il faut aborder les problèmes de la coopération. ■

■ LES AUTEURS



Jean-Paul DELAHAYE et Philippe MATHIEU sont professeurs à l'université de Lille et chercheurs au laboratoire CRISTAL (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille).

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Mathieu et J.-P. Delahaye, **New winning strategies for the iterated prisoner's dilemma**, *Proc. of the 2015 Int. Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2015 (<https://hal.inria.fr/hal-01199149>).

J.-P. Delahaye, **Le dilemme du prisonnier et l'illusion de l'extorsion**, *Pour la Science*, n° 435, pp. 78-83 janvier 2014, .

C. Hilbe et al., **Evolution of extortion on Iterated Prisoner's Dilemma games**, *PNAS*, vol. 110(17), pp. 6913-6918, 2013.

W. Press et F. Dyson, **Iterated Prisoner's Dilemma contains strategies that dominate any evolutionary opponent**, *PNAS*, vol. 109(26), pp. 10409-10413, 2012.

B. Beaufils et al., **Our meeting with gradual, A good strategy for the iterated prisoner's dilemma**, *Artificial Life V*, C. G. Langton et K. Shimohara (eds.), pp. 202-209, MIT Press/Bradford Books, 1996.



Retrouvez la rubrique
Logique & calcul sur
www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Antman, petit mais costaud !

Réduire sa taille à volonté, faire des bonds spectaculaires, communiquer avec les fourmis, Antman peut-il réaliser de tels exploits en respectant les lois du monde atomique et de la physique quantique ?

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER

Illustration : Marc BOULAY

Un nouveau superhéros a débarqué sur nos écrans. Son pouvoir ? La capacité de rétrécir à la taille d'une fourmi grâce à une combinaison spéciale et une « formule » mises au point par le scientifique Hank Pym. Dans *Antman* (2015), Marvel Studios s'écarte de ses superhéros classiques pour mettre en scène un ancien cambrioleur, Scott Lang, qui, voulant récupérer le droit de voir sa fille, se retrouve embarqué dans une folle aventure.

L'idée de raconter les aventures d'un humain rétréci n'est pas récente, à l'image des romans *Les voyages de Gulliver*, de Jonathan Swift (1726), et *L'homme qui rétrécit*, de Richard Matheson (1956).

Le cinéma n'est évidemment pas en reste. En 1966, Richard Fleischer réalise *Le voyage fantastique*, qui relate les aventures d'une équipe de chirurgiens envoyés, à bord d'un sous-marin microscopique, dans le sang d'un patient afin de mener dans son cerveau une opération impossible à réaliser de l'extérieur. Plus près de nous, le film *Chérie, j'ai rétréci les gosses !* (1989) narre les aventures d'un inventeur excentrique dont les enfants font les frais de sa machine à rétrécir les objets.

Les superhéros ont, eux aussi, eu le droit de visiter le monde microscopique dès 1940 avec Atom. Il sera rejoint plus tard par Antman et Wasp (la Guêpe).

Dans tous les cas, l'exploration du monde microscopique donne lieu à des aventures extraordinaires et il est assez plaisant de

se mettre à la place de personnages aux prises avec un univers surdimensionné. Mais que se passerait-il vraiment si nous devenions subitement aussi petits qu'une fourmi ? La physique et la biologie peuvent répondre à cette question.

Le concepteur du costume d'Antman, Hank Pym, explique le principe de son invention par une diminution de l'espace entre les atomes. Un atome mesure quelques dixièmes de milliardième de mètre, mais son noyau est 100 000 fois plus petit ! Ainsi, l'idée de Pym semble bonne : réduire la taille d'un atome, dont le volume est essentiellement vide, devrait permettre de réduire la taille d'un objet.

Mais l'argument de Pym ne tient pas. La taille d'un atome n'est pas arbitraire, elle résulte d'un équilibre physique subtil entre les électrons et le noyau atomique. Hank Pym semble oublier une règle de la physique quantique : un électron confiné est d'autant plus agité que le volume de confinement est petit. Pourquoi l'électron ne se rapproche-t-il pas plus du noyau ? Parce que cela reviendrait à le confiner dans un volume de plus en plus restreint, donc à augmenter sa vitesse.

Plus précisément, la vitesse de l'électron étant inversement proportionnelle à la taille de la « boîte atomique », son énergie de mouvement, qui varie comme le carré de la vitesse, sera inversement proportionnelle au carré de cette taille. Dans le même temps, pour maintenir la cohésion de l'atome, l'énergie de liaison électrostatique entre le noyau



ANTMAN DÉFIE LES LOIS de la physique. Grâce à sa combinaison, il réduit sa taille à celle d'un insecte et chevauche une fourmi ailée qui lui sert de destrier.